

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14838

研究課題名(和文) Regulation of stacking fault energy and manipulation of mechanical mechanism for developing novel superior high entropy alloys

研究課題名(英文) Regulation of stacking fault energy and manipulation of mechanical mechanism for developing novel superior high entropy alloys

研究代表者

魏 代修 (Wei, Daixiu)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：20785810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ハイエントロピー合金(HEA)は多くの注目を集めており、積層欠陥エネルギー(SFE)がその機械的挙動に影響を与えている。本研究は、第一原理計算、熱力学計算と実験を融合することで、四元系および五元系HEAの弾性および塑性挙動を制御するための原理を明らかにした。例えば、Co量の増加とFeおよびNi量の減少はSFEを低下させる一方で、弾性率、異方性、および格子摩擦応力の上昇を示した。また、わずかなMo添加によって格子歪みは増加したが、SFEと弾性率は減少した。これらの結果に基づいて、高強度および高延性を両立させる準安定HEAを開発し、高性能金属材料の開発指針を見出すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属材料が工業的に用いられる材料の中でも重要な地位を占めているが、一般に金属材料を高強度化すると、その一方で延性が低下する。そこで研究者は高強度および高延性を両立させる金属材料の開発を目指している。ハイエントロピー合金には、従来合金には見られない特異で優れた機械的特性を示すものが多く見られます。本研究は、第一原理計算、熱力学計算と実験を融合することで、ハイエントロピー合金の開発および力学特性を向上する指針を明らかにした。積層欠陥エネルギーの低下と格子歪みの増加により、高強度と高延性の両立を可能にした。今後の次世代高性能金属材料開発設計に大きく寄与するものであると考える。

研究成果の概要(英文)：High-entropy alloys (HEAs) have attracted much attention, with stacking fault energy (SFE) affecting their mechanical behaviors. The present study revealed the principles for regulating elastic and plastic behaviors of the quaternary CoCrFeNi and quinary CoCrFeMnNi HEAs, assisted by ab initio and thermodynamics calculations. The results showed that an increase in Co content and a decrease in Fe and Ni contents reduced the SFE, but enhanced the elastic modulus, anisotropy, and lattice friction stress. Minor addition of Mo increased the lattice distortion but decreased the SFE and elastic modulus. Then, a series of strong and ductile metastable Co-rich HEAs with superior mechanical properties were proposed. The properties are enhanced by solid-solution strengthening accompanied by a low-SFE-induced restriction of planar behavior of dislocations, mechanical twinning, and strain-induced martensitic transformation. The findings shed light on the development of high-performance HEAs.

研究分野：材料加工

キーワード：金属材料 機械特性 第一原理計算 熱力学計算 塑性変形 強度 延性

1. 研究開始当初の背景

ハイエントロピー合金(HEA)は、4種類以上の多元系元素から構成され、学術的にも注目を集めている。中でも FeMnCoCrNi 合金は、非常に広い温度範囲で優れた fcc 相の安定性を示し、極低温でも優れた機械的特性を示すことから、最もよく研究されている HEA の一つである[1-2]。この興味深い特性は、複数の主成分が混ざり合うことによる格子歪みと遅い拡散の影響だと考えられている (Fig.1)。室温では転位のすべりが唯一の塑性変形モードであるが、極低温では変形双晶が発生する[2]。

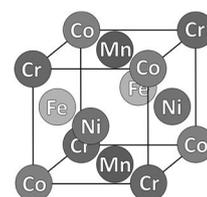


Fig. 1. Structure of FeMnCoCrNi HEA.

近年、fcc 相の安定性と積層欠陥エネルギー (SFE) の低下に由来する双晶誘起塑性(TWIP)および変態誘起塑性補助二相(TRIP-DP)Fe_{80-x}Mn_xCo₁₀Cr₁₀ HEA が開発された(Fig.2)[3-4]。この2種類の合金は、それぞれ変形双晶とひずみ誘起マルテンサイト変態(SIMT)の効果により、強度と延性のトレードオフを克服している。しかし、引張強度は Co 基合金に比べて劣る。また、SFE の制御とそれに伴う塑性変形挙動への影響はあまり明らかになっていない。したがって、優れた機械的特性を示す新規 fcc 相 Co リッチ HEA を開発し、SFE と機械的挙動の制御に関する基本的な原理を解明することが求められている。

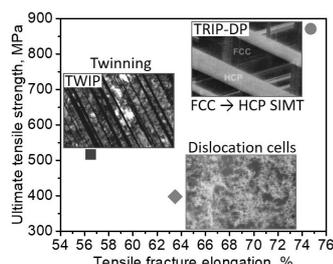


Fig. 2. Three types of HEAs.

fcc 相合金の SFE は、塑性変形のメカニズムを支配する主要因子である。SFE を徐々に下げていくと、転位すべりから双晶、そして fcc→hcp の SIMT へと変形様式が切り替わるが、双晶と SIMT はいずれもショックレー部分転位の運動によって進行する。部分転位が2つの連続した{111}面上をすべると双晶が発生する (Fig.3b)。一方、部分転位が1つの{111}面上をすべった場合には、局所的な hcp 積層順序を持つ固有積層欠陥が生成され、部分転位が2つの{111}面ごとにすべった場合には、hcp 相のエンプリオが生成される (Fig. 3c)。SFE が低い fcc 相の金属では、完全転位がショックレー部分転位のペアに解離する。

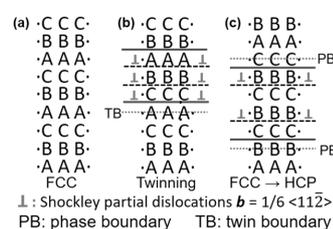


Fig. 3. (a) atomic stacking of fcc phase, (b) deformation twinning, (c) fcc to hcp SIMT.

一方、fcc 相の安定性と SFE には、温度が大きく影響している。固有 SFE γ_I は次のように記述される[5]: $\gamma_I = 2\rho_A \Delta G^{fcc \rightarrow hcp} + 2\sigma^{fcc \rightarrow hcp}$ ここで $\Delta G^{fcc \rightarrow hcp}$ は fcc 相と hcp 相のモルギブズ自由エネルギー差、 ρ_A は最密充填面における原子のパッキング密度、 $\sigma^{fcc \rightarrow hcp}$ は整合界面エネルギーである。高温で fcc 相が安定化し低温では hcp 相が安定化する場合、あるいはその逆の場合、SFE は温度が下がるにつれて低くなる。このように、HEA の機械的特性と温度との関係を明らかにすることは非常に重要であるが、現在までにこの関係は明らかになっていない。そこで本研究では、SFE を制御した新規 Co リッチ HEA を開発し、開発した HEA の SFE を制御して機械的特性がどのように変わるか調べることを目的とする。

2. 研究の目的

上述の通り、HEA には重要な科学的に解明すべき疑問が多くある。本研究では、新規 fcc 相ハイエントロピー合金の積層欠陥エネルギーの制御による機械的特性がどのように変化するか、および新規 fcc 相ハイエントロピー合金の変形双晶と fcc→hcp マルテンサイト変態メカニズムの解明を目的とする。

そこで、本研究では、SFE を制御することで機械的特性を変化させた新しい Co 系ハイエントロピー合金を設計し、その塑性変形と破壊のメカニズムを、温度と結晶粒径の影響を考慮して調べ、変形前のハイエントロピー合金における変形双晶と fcc→hcp マルテンサイト変態のメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 熱力学と第一原理計算

HEA の SFE と機械的特性を制御する因子を明らかにするために、まず熱力学計算と第一原理計算を行った。TWIP および TRIP Co-rich HEA の 2 種類の合金を開発し、状態図は Thermo-Calc により計算した。HEA の SFE は、密度汎関数理論(DFT)を用いた第一原理計算により算出した。今後、組成が fcc 相の安定性や SFE に与える影響をさらに明らかにする。

(2) 新規設計した Co リッチ HEA の試料作製

SFE が正、ほぼゼロ、負の合金の 3 種類について、アーク溶解後、均質化のため 1200°C、5 時間の熱処理を行った。その後、1200°C で圧下率 50% の熱間圧延、室温で圧下率 40% の圧延を行い、焼鈍し均質な結晶粒組織を得た。

(3) 塑性変形・破壊メカニズムの解明

犬の骨の形をした試験片を用いて、25°C で引張試験を行った。破断した試験片のひずみ分布は、Fig. 4 に示す DIC(Digital Image Correlation)法で測定した。また、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡、X 線回折により、変形後のミクロ組織について調査した。そして HEA の変形・破壊挙動と SFE の影響を明らかにし、考察した。

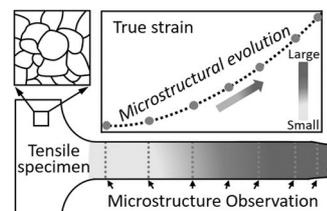


Fig. 4. The strain distributions determined by DIC method.

(4) 双晶と SIMT に及ぼす粒径の影響

双晶と SIMT に及ぼす粒径の影響を調査するため、変形双晶と SIMT を示す 2 種類の HEA を選択した。この 2 種類の合金の結晶粒径を、サブミクロン、数十マイクロン、数百マイクロメートルになるように、異なる条件で焼鈍した。変形双晶と SIMT に及ぼす結晶粒径の影響を調べた。

(5) SFE 値と変形挙動に及ぼす温度の影響

熱力学計算と第一原理計算を組み合わせ、今回用いた TWIP と TRIP の 2 種類の合金の fcc 相の安定性と SFE に及ぼす温度の影響を調べた。また、(3) について異なる温度での引張試験を行い、HEA の変形挙動に及ぼす温度の影響を明らかにした。

4. 研究成果

本研究では、熱力学計算と第一原理計算を用いて SFE を制御し、従来より特性に優れた新規安定 Co リッチ HEA を設計することに成功した。Fig.5a のギブス自由エネルギー差曲線 $\Delta G^{\text{fcc-hcp}}$ より、 $\text{Co}_x\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{75-x}$ 合金において、Co 濃度が増加することで fcc 相 (γ 相) の安定性の低下することが分かる。さらに、 γ 相は高温でより安定しているのに対し、hcp 相 (ϵ 相) は低温でより安定する傾向があり、これは従来の Co 基合金と同様である。Fig.5b の 0K における各合金の一般化 SFE (GSFE) 曲線は、最密{111}面において $1/6 \langle 112 \rangle_\gamma$ に沿って移動することにより、積層欠陥が発生することを示す。転位核生成の最低エネルギー障壁を示す不安定 SFE (γ_{usf}) は、Co 含有量の増加に伴い、343.2 から 412.5 mJ/m^2 へと徐々に増加している。これは、Co リッチ合金が転位核生成に対してより高い抵抗力を示すこと(すなわち、Co 濃度が低い合金よりも高い降伏強度を示すこと)を示している。一方、Fig.5c では、 γ_{isf} と γ_{esf} で示された固有 SFE と外部 SFE の値を比較している。これは、Co 含有量の増加により、 γ_{isf} および γ_{esf} の両方が低下し、 γ_{isf} の値が γ_{esf} よりも小さいことを示している。このことから、Co 基超合金では、Fe と Ni が γ 相を安定化させることがわかった。また、Ni 濃度を下げたり、Co 濃度を上げたりすると、SFE が著しく低下する。したがって、配位によって SFE が低下し、 γ 相の

安定性が低下することで、HEA の塑性変形挙動に影響を与えると考えられる。

このようにして設計された新規 HEA の塑性変形メカニズムと機械的特性を、TEM により調べた。Fig.6a-c は、破断した Co_{25} サンプルの明視野像 (Fig.6a) 高倍率 HADDF 像 (Fig.6b) 回折パターン (Fig.6c) である。高密度の転位と、矢印で示した厚さ 10 nm 以下の变形誘起ナノ双晶が観察される。双晶の要素は Fig.6b-c に示すように、 $K_1 = (111)_\gamma$, $\eta_1 = [11\bar{2}]_\gamma$, $K_2 = (11\bar{1})_\gamma$, $\eta_2 = [112]_\gamma$ であった。これは、fcc 金属でよく見られる双晶系であり、最密 $\{111\}$ 面上のショックレー部分転位の動きによって形成される。Fig. 6d-f は、破断した Co_{45} 試料の明視野像 (Fig.6d) 高倍率 HADDF 像 (Fig.6e) 回折パターン (Fig.6f) である。Fig.6d では、 γ 相と ϵ 相からなるラメラ構造が観察された。原子の積層順序は、 $\langle 111 \rangle_\gamma$ と $[000]_\epsilon$ の方向に沿って、それぞれ ABCABC $_\gamma$ と ABABAB $_\epsilon$ となっていた。この 2 つの相は、次のような配向関係にある： $\{111\}_\gamma // (0001)_\epsilon$, $\langle 110 \rangle_\gamma // [11\bar{2}0]_\epsilon$ 。これは Ti-Al 合金の γ 相と α_2 相からなるラメラ構造と類似している。 ϵ 相は SIMT による塑性変形中に γ 相中に形成された。これは 2 番目の $\{111\}_\gamma$ 面ごとにショックレー部分転位が形成され、伝播することによって達成される。一方、 Co_{35} 試料では Co_{25} 試料よりも SFE が低く、XRD において破断した Co_{35} 試料に ϵ 相が検出されなかったことから、双晶が比較的容易に活性化されることが推測される。変形双晶の活性化の可能性が高いことが、強度と伸びの向上に寄与している。これは、SFE を低くすることで、塑性変形の挙動が変形双晶から fcc \rightarrow hcp への SIMT に切り替わることを示している。

さらに、新規 Co リッチ ($\text{Co}_x\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{75-x}\text{Mo}_5$; x : 30, 40, 50) HEA の物性に及ぼす SFE と Mo 添加の影響を調べた。(x :30, 40, 50) の HEA を、それぞれ $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$, $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$, $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$, $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ と表記する。Fig.7a-c は、開発 HEA の 0K における GSFE 曲線を表す。また、Fig.7d-e は、計算された γ_{isf} および γ_{esf} をプロットしたものである。この結果から、 γ_{isf} , γ_{usf} , γ_{esf} , および γ_{utf} の値は、Co を Mo で置換すると減少し、Mo の濃度が高いほど低い値が得られることがわかる。一方、Co の含有量が増えると、 γ_{isf} と γ_{esf} は減少し、 γ_{usf} と γ_{utf} は増加する。一般的に、 γ_{usf} は部分転位の核生成のエネルギー障壁の指標とされ、

γ_{isf} は積層欠陥の安定性の指標として用いられる。今回の結果より、Mo と Co の含有量を増やしたり、Fe と Ni の含有量を減らしたりすると、fcc 相が不安定になり、HEA の微細構造や機械的挙動に影響を与えることがわかった。調査したすべての合金において、 γ_{isf} の値は γ_{esf} の値よりも低かった。したがって、これらの HEA においては、エネルギー的に外部 SF よりも固有 SF の形成が優先される。低 SFE の fcc 相金属では、固有 SF がよく観測されるのに対し、外部-固有 SF のペアはあまり報告がない。さらに、Co リッチ HEA は転位の生成に対して高い抵抗性を示している。計算で得られた γ_{isf} , γ_{usf} , γ_{utf} を用いて、双晶応力を推定した。Fig.7f に示した結果は、Mo または Co の含有量が増えるにつれて、摩擦応力が減少することを示している。Mo の場合に観察された傾向は、主に γ_{utf} の減少によるものであるが、Co 含有量が増加した場合には、 γ_{isf} の減少と γ_{usf} の

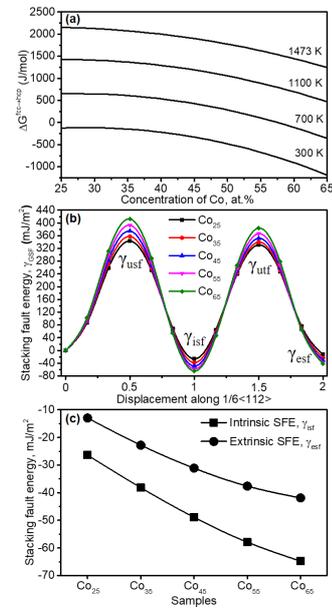


Fig. 5. (a) Gibbs free energy difference between hcp and fcc phase of $\text{Co}_x\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{75-x}$ (x : 25~65) HEAs calculated by Thermo-Calc; (b) generalized-SFE of $\{111\}\langle 112 \rangle$ slip and (c) the intrinsic and extrinsic SFE calculated by DFT method.

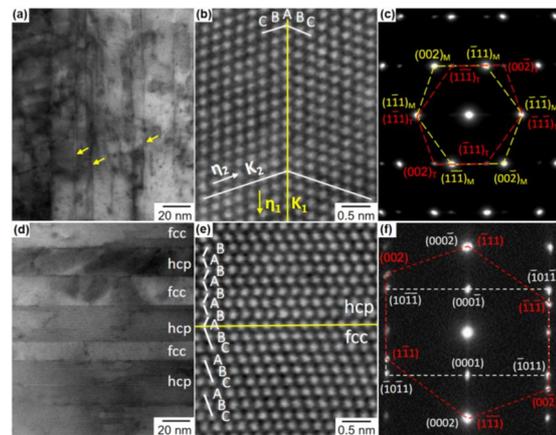


Fig. 6. STEM (a, d) bright field images, (b, e) HADDF images and (c, f) diffraction patterns of (a-c) $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{25}$ alloy and (d-f) $\text{Co}_{45}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{15}$ alloy after tensile to fracture at room temperature.

増加の組み合わせにより、摩擦応力が低下した。

また、開発合金について室温での機械的性能を測定した。

Fig.8a,b に室温での引張特性を示す。Fig.8a は応力-ひずみ曲線である。Co 含有量の増加に伴い、降伏強度と UTS が明らかに向上している。降伏強度は 214MPa ($\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$) から 403MPa ($\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$)、576MPa ($\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$) まで、約 2 倍に向上している。UTS は 613MPa ($\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$) から 861MPa ($\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$)、1133MPa ($\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$) と増加し、 $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ のほぼ 2 倍であり、降伏強度と UTS はともに Mo を含まない Co リッチ HEA よりも高くなっていった。さらに、 $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$ と $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$ の試料では、それぞれ 87.8% と 91.4% の大きな伸びが観察され、これは $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ の伸び (77.4%) よりも高い値である。 $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$ は、他の試料と比べて 60.6% とわずかに低い伸びを示した。さらに、Fig.8b に示すように、各試料は様々なひずみ硬化挙動を示し、Co を多く含む試料はより高い加工硬化率を示した。 $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ と $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$ の加工硬化率はひずみの増加とともに徐々に減少しているが、 $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$ では、ひずみが 0.5 までは加工硬化率はほぼ一定で、その後減少している。 $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$ は、加工硬化率が急激に増加し、ひずみ 0.35 でピーク値を示してその後ゆっくりと減少した。 $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$ と $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$ では、多量の hcp 相が観察され、この 2 つの試料では塑性変形中に fcc→hcp の相変態が起こったことを示している。 $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ と $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$ では hcp に関連するピークは観測されなかった。

本研究では、第一原理計算と熱力学計算を用いて、fcc 相の CoCrFeNi および CoCrFeMnNi において、組成変更と Mo 添加による弾性・塑性挙動の制御手法を明らかにすることに成功した。Co 濃度の増加、また Fe および Ni 濃度の減少により、fcc 相の安定性と SFE が減少し、弾性率、異方性、および格子摩擦応力が増加した。また、Co を Mo で置換すると、格子定数は増加し、SFE と弾性率は減少した。これらの知見に基づいて、我々は、強度と延性に優れた準安定な fcc 相による Co リッチ準安定 HEA を開発した。また本研究により開発合金は、Mo 添加により SFE が低くなり、転位の運動や変形双晶、ひずみ誘起マルテンサイト変態が制限されるため機械特性が向上したことが明らかにした。本成果は、今後の高性能多元系金属材料の開発に寄与するものである。

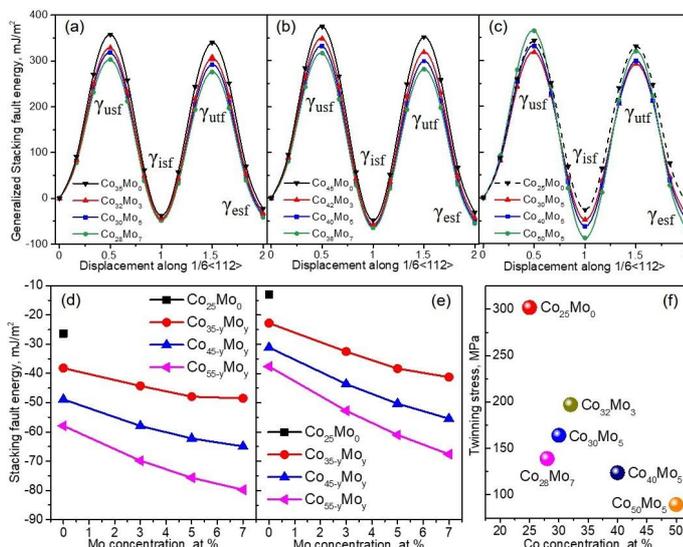


Fig. 7. The generalized-SFE of the fcc $\{111\}\langle 112\rangle$ slip of (a) $\text{Co}_{35-y}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{20}\text{Mo}_y$ ($y: 0, 3, 5, 7$), (b) $\text{Co}_{45-y}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Mo}_y$ ($y: 0, 3, 5, 7$), (c) $\text{Co}_x\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{70-x}\text{Mo}_5$ ($x: 30, 40, 50$) and $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{25}$ HEAs calculated using ab initio method. The corresponding (d) intrinsic and (e) extrinsic SFE of the considered fcc phase $\text{Co}_x\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{75-x-y}\text{Mo}_y$ ($x: 25 \sim 55; y: 0 \sim 7$) HEAs. (f) Theoretical twinning stress of some selected fcc phase HEAs.

Fig. 8a,b に示すように、各試料は様々なひずみ硬化挙動を示し、Co を多く含む試料はより高い加工硬化率を示した。 $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ と $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$ の加工硬化率はひずみの増加とともに徐々に減少しているが、 $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$ では、ひずみが 0.5 までは加工硬化率はほぼ一定で、その後減少している。 $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$ は、加工硬化率が急激に増加し、ひずみ 0.35 でピーク値を示してその後ゆっくりと減少した。 $\text{Co}_{40}\text{Mo}_5$ と $\text{Co}_{50}\text{Mo}_5$ では、多量の hcp 相が観察され、この 2 つの試料では塑性変形中に fcc→hcp の相変態が起こったことを示している。 $\text{Co}_{25}\text{Mo}_0$ と $\text{Co}_{30}\text{Mo}_5$ では hcp に関連するピークは観測されなかった。

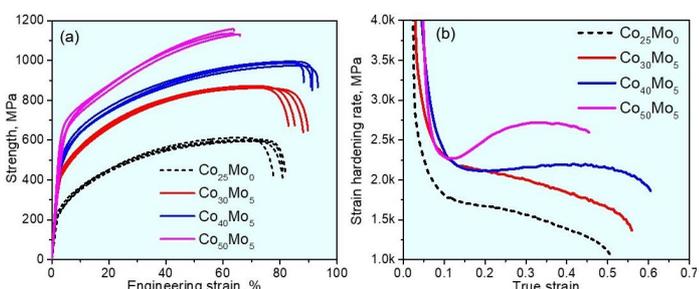


Fig. 8. Tensile properties of the $\text{Co}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{25}$ and $\text{Co}_{30}\text{Cr}_{25}(\text{FeNi})_{75-x}\text{Mo}_5$ ($x: 30, 40, 50$) HEAs: (a) Engineering tensile stress-strain curves, (b) strain hardening rates.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Xiaoqing Li, Daixiu Wei, Levente Vitos, Raquel Lizarraga	4. 巻 820
2. 論文標題 Micro-mechanical properties of new alternative binders for cemented carbides: CoCrFeNiWx high-entropy alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 153141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2019.153141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Daixiu Wei, Xiaoqing Li, Stephan Schonecker, Jing Jiang, Won-Mi Choi, Byeong-Joo Lee, Hyoung Seop Kim, Akihiko Chiba, Hidemi Kato	4. 巻 181
2. 論文標題 Development of strong and ductile metastable face-centered cubic single-phase high-entropy alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 318-330
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2019.09.050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Daixiu Wei, Xiaoqing Li, Jing Jiang, Weicheng Heng, Yuichiro Koizumi, Won-Mi Choi, Byeong-Joo Lee, Hyoung Seop Kim, Hidemi Kato, Akihiko Chiba	4. 巻 165
2. 論文標題 Novel Co-rich high performance twinning-induced plasticity (TWIP) and transformation-induced plasticity (TRIP) high-entropy alloys	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 39-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2019.02.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Daixiu Wei, Xiaoqing Li, Weicheng Heng, Yuichiro Koizumi, Feng He, Won-Mi Choi, Byeong-Joo Lee, Hyoung Seop Kim, Hidemi Kato, Akihiko Chiba	4. 巻 7
2. 論文標題 Novel Co-rich high entropy alloys with superior tensile properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Research Letters	6. 最初と最後の頁 82-88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21663831.2018.1553803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhen Lu, Fan Zhang, Daixiu Wei, Jiuhui Han, Yanjie Xia, Jing Jiang, Mingwang Zhong, Akihiko Hirata, Kentaro Watanabe, Alain Karma, Jonah Erlebacher, Mingwei Chen	4. 巻 212
2. 論文標題 Vapor phase dealloying kinetics of MnZn alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 116916
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2021.116916	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hai-Long Yi, Daixiu Wei, Ren-Yi Xie, Yi-Fan Zhang, Hidemi Kato	4. 巻 819
2. 論文標題 A strategy for enhancing the mechanical property of the precipitation-strengthened medium-entropy alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 141390
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.141390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Feng He, Bin Han, Zhongsheng Yang, Da Chen, Guma Yeli, Yang Tong, Daixiu Wei, Junjie Li, Zhijun Wang, Jincheng Wang, Ji-jung Kai	4. 巻 72
2. 論文標題 Elemental partitioning as a route to design precipitation-hardened high entropy alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science & Technology	6. 最初と最後の頁 52-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmst.2020.09.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J Jiang, W-S Ko, S-H Joo, DX Wei, T Wada, H Kato, DV Louzguine-Luzgin	4. 巻 854
2. 論文標題 Experimental and molecular dynamics studies of phase transformations during cryogenic thermal cycling in complex TiNi-based crystalline/amorphous alloys	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 155379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.155379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hai-long Yi, Daixiu Wei, Ren-yi Xie, Yi-fan Zhang, Hidemi Kato	4. 巻 14
2. 論文標題 Microstructure refinement of a transformation-induced plasticity high-entropy alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma14051196	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ning Ma, Shifeng Liu, Wei Liu, Lechun Xie, Daixiu Wei, Liqiang Wang, Lanjie Li, Beibei Zhao, Yan Wang	4. 巻 8
2. 論文標題 Research Progress of Titanium-Based High Entropy Alloy: Methods, Properties, and Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 1303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2020.603522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hai-long Yi, Daixiu Wei, Yingchen Wang, Liqiang Wang, Ming-yang Fang, Kang Yang, Hidemi Kato	4. 巻 10
2. 論文標題 Hot Deformation and Dynamic Recrystallization Behavior of CoCrNi and (CoCrNi) 94Ti3Al3 Medium Entropy Alloys	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1341
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met10101341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Noman Hafeez, Jia Liu, Liqiang Wang, Daixiu Wei, Yujin Tang, Weijie Lu, Lai-Chang Zhang	4. 巻 34
2. 論文標題 Superelastic response of low-modulus porous beta-type Ti-35Nb-2Ta-3Zr alloy fabricated by laser powder bed fusion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Additive Manufacturing	6. 最初と最後の頁 101264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.addma.2020.101264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Feng He, Kaiwei Zhang, Guma Yeli, Yang Tong, Daixiu Wei, Junjie Li, Zhijun Wang, Jincheng Wang, Ji-jung Kai	4. 巻 183
2. 論文標題 Anomalous effect of lattice misfit on the coarsening behavior of multicomponent L12 phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 111-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.03.030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Qiang Li, Chao Cheng, Junjie Li, Ke Zhang, Kai Zhou, Masaaki Nakai, Mitsuo Niinomi, Kenta Yamanaka, Daixiu Wei, Akihiko Chiba, Takayoshi Nakano	4. 巻 29
2. 論文標題 Low Young 's Modulus and High Strength Obtained in Ti-Nb-Zr-Cr Alloys by Optimizing Zr Content	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Materials Engineering and Performance	6. 最初と最後の頁 2871-2878
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11665-020-04826-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kosuke Ueki, Motoka Kasamatsu, Kyosuke Ueda, Yuichiro Koizumi, Daixiu Wei, Akihiko Chiba, Takayuki Narushima	4. 巻 10
2. 論文標題 Precipitation during - Phase Transformation in Biomedical Co-Cr-Mo Alloys Fabricated by Electron Beam Melting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met10010071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Daixiu Wei, Weicheng Heng, Hidemi Kato, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Development of novel Co-rich high entropy alloys with superior tensile properties
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2019年度春季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Weicheng Heng, Zhen Lu, Hidemi Kato, Akihiko Chiba
2. 発表標題 The design of high performance Co-rich high entropy alloys
3. 学会等名 Chinese Materials Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Xiaoqing Li, Weicheng Heng, Zhen Lu, Won-Mi Choi, Byeong-Joo Lee, Hyung Seop Kim, Hidemi Kato, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Superior Co-rich high entropy alloys-the design, microstructures, and mechanical behaviors
3. 学会等名 The 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Weicheng Heng, Daixiu Wei, Hidemi Kato, Akihiko Chiba
2. 発表標題 Development of novel biomedical high entropy alloys
3. 学会等名 International Conference on Materials and System for Sustainability 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Akihiko Chiba, Hidemi Kato
2. 発表標題 Development of strong and ductile single phase high entropy alloys
3. 学会等名 The 10th IFAMST & The 1st Materials Conference in Greater Bay Area (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Hidemi Kato
2. 発表標題 Development of strong and ductile high entropy alloys for biomedical applications
3. 学会等名 International Joint Symposium 2020, The 15th International Workshop on Biomaterials in Interface Science & The 11th Symposium on Innovative Dental-Engineering Alliance (IDEA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shokouh Attarilar, Liqiang-Wang, Junlin Yang, Daixiu Wei, Hidemi Kato
2. 発表標題 Nanomodification of dental implants to improve its mechanical and biological performance
3. 学会等名 International Joint Symposium 2020, The 15th International Workshop on Biomaterials in Interface Science & The 11th Symposium on Innovative Dental-Engineering Alliance (IDEA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Weidong Zhang, Yong Liu, Hong Wu, Huiping Tang, Daixiu Wei, Hidemi Kato
2. 発表標題 Physical properties of Ti-36Nb-2.0Ta-3.0Zr-0.350 alloy prepared by powder metallurgy
3. 学会等名 International Joint Symposium 2020, The 15th International Workshop on Biomaterials in Interface Science & The 11th Symposium on Innovative Dental-Engineering Alliance (IDEA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yingchen Wang, Liqiang Wang, Daixiu Wei, Hidemi Kato
2. 発表標題 Microstructure evolution and deformation behavior of graphene oxide induced TiC reinforced Ti6Al4V processed by friction stir processing
3. 学会等名 International Joint Symposium 2020, The 15th International Workshop on Biomaterials in Interface Science & The 11th Symposium on Innovative Dental-Engineering Alliance (IDEA) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Hidemi Kato
2. 発表標題 Meta-stabilization of high entropy alloys for simultaneously enhancing strength and ductility
3. 学会等名 日本材料学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Tomohito Tsuru, Norihiko L. Okamoto, Tetsu Ichitsubo, Hidemi Kato
2. 発表標題 Development of high performance non-equiatomic high entropy alloys
3. 学会等名 東北大学金属材料研究所講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daixiu Wei, Tomohito Tsuru, Norihiko L. Okamoto, Tetsu Ichitsubo, Hidemi Kato
2. 発表標題 Tailoring local structure of high entropy alloys to overcome the strength-ductility trade-off
3. 学会等名 日本金属学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	POSTEC			
スウェーデン	KTH - Royal Institute of Technology			
中国	Shanghai Jiao Tong University			